

中性子星は膨らむか

—X線バーストに関連して—

花 輪 知 幸*

X線バーストは、X線連星が数時間から1日に1回の割合で約10秒間、太陽の約1万倍もの明るさになる現象である。X線バーストの観測、理論については、日本の衛星“白鳥”がこの分野で活躍していることもあって、月報誌上において何度も紹介されている(天文月報1977年12月号, 80年2, 4, 7, 11月号, 81年1, 2月号)。そこで、X線バースト全般についてはそちらを参照していただきたい。今回は最近の理論的話題の中からということで標題のようにテーマを絞らせていただく。

1. 1981年までの話

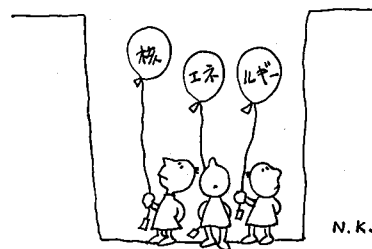
X線バーストは中性子星と太陽より軽い星からなる連星から観測されるので普通次のように考えられている。太陽より軽い星、以下こちらを伴星と呼ぶ、の重力圏から何らかの原因、例えば伴星の進化によってあふれ出たガスが中性子星に降る。降ったガスがある程度たまると熱核反応を起して水素・ヘリウムの混合物だったガスが燃えて鉄などになる。その燃え方は速く、燃料の供給が間に合わず、燃料を使い尽してしまう。燃料ぎれで核反応が止まると、また徐々に燃料のガスがたまり、ある程度ガスがたまったら再び核反応が起る。このように間欠的に解放された核エネルギーによって明るくなった中性子星を私たちはX線バーストとして見ている。このような燃え方をフラッシュと呼び、このようなモデルを熱核フラッシュモデルと呼ぶ。正確に言うとその熱核フラッシュモデルで説明されるのはI型X線バーストで、他にII型X線バーストが存在するが、II型は現在一つのX線星でしか見つかっていないのでI型と特にことわらずにX線バーストの名前をこの稿では使う。

核エネルギーが解放されて熱くなった表面のガスは、熱気球と同じように膨張する。一体どのくらい膨張するのだろうか。中性子星は半径が約10kmであるのに太陽と同じくらいの質量をもつ高密度な天体である。その表面から脱出するのに必要な速度は光速の約半分というものすごく深い重力の井戸になっている。脱出に必要なエネルギーという言い方によると1g当り約 10^{20} ergとなる。十分に膨張するにも同程度のエネルギーが必要である。核エネルギーの解放量は水素を鉄にした時という

最大値を考えても1g当り約 8×10^{18} ergである。フラッシュの際に解放されるエネルギーの総量は燃えたガスの総質量に比例するが、重力に逆らって膨張するのに必要なエネルギーも同様に比例して増えるので、どのくらいガスがたまったらフラッシュがおきても膨張に必要なエネルギーの約1割以下しか与えられない。したがってフラッシュの際にも中性子星は膨らまない、というのが1981年までの考え方であった。中性子星の深い重力の井戸からはい上るには核エネルギーでも足りないというわけである。

2. 1982年の話

1982年になると前節の議論にもかかわらず、著者を含む何人かの人達が(花輪・杉本, ターム, ウォレス・ウースリー・ウィーバーなど), 数値計算(コンピューター)でフラッシュの模擬実験を試みたところ、中性子星は膨らんだという報告を独立にした。こういった数値計算は1981年以前にもなされていたが、1982年まで中性子星が膨らむという報告はなかった。また、前にも述べたように膨らまなくて当然と考えられていたので、膨らむという結果が出たことは不思議なことだった。しかも膨らむのは速く、この年に発表された数値計算はみな膨張をうまく追いかけることができていない。そんな結果を出す数値計算を信頼できるのだろうかと疑問も湧いてくる。しかし、数値計算の結果をよく調べてみる



N.K.

中性子星

* 東大理 Tomoyuki Hanawa: Can Neutron Stars Expand?

と、次のようなメカニズムが存在するので、中性子星は現実に膨らみうるということがわかった。

まず、前節の議論のどこに誤りがあったかを検討しよう。たとえ話で考えるとこうなる。1人当り100円しかお金がない時に映画に行けるだろうか。映画へ行くには1人当り1000円以上かかるので誰も映画へは行けない、というのは誤りである。例え1人当り2000円かかって20人にひとりの割で映画にゆくことができる。同様に核エネルギーは重力に比べて少なくともごく一部を膨らますことなら可能である。事実数値計算も核エネルギーがつき込まれた領域のごく表面だけが膨らむことを示している。つまり少ない資源（エネルギー、お金など）でも有効に使えばほんのひと握りの部分（人）はかなりのことができるというわけだ。

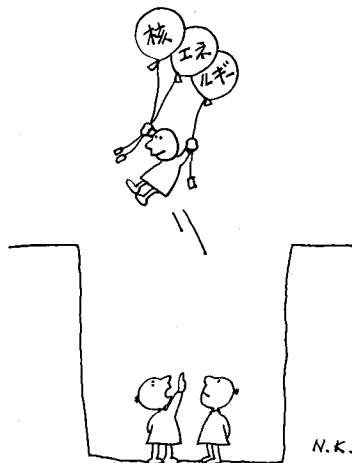
さて全体としてのエネルギー（資金）不足は解決したがまだ説明しなければならないことがある。一体誰が何故の権利があって人を押しつけて映画に行けるのかという問題と同様に、何故表面層だけが他からエネルギーを集めて膨らむのかという問題がある。人間界の富の分配の問題はさておき、物理の話としてエネルギーの等分配の話はよく聞かすが、エネルギーの集中というのはめずらしい。それもエネルギーの輸送が熱（光）の拡散によるのだからなおさら奇妙な感じがする。熱の拡散は温度が高い所から低い所へ熱が伝わる現象で、まわりに比べて温度の高い所は熱（エネルギー）を逃し、温度の低い所には熱（エネルギー）が入ってくる。したがって熱の拡散はエネルギーを公平に分配しそうに見えるからである。

星の場合、熱（光）の拡散によって運べるエネルギーにはエディントン限界と呼ばれる上限がある。星の明るさの上限としてエディントン光度とも言う。先に述べたエネルギーの集中はこの限界に近い速さでエネルギー

（光）を流そうとすると起る現象である。中性子星の表面近くでこの限界を計算してみると、表面より内側で流せるエネルギーの限界、エディントン限界が大きくなっている。交通渋滞を見てもわかるように、道が狭くなっているところや交差点などの車の流れにくいところに長い列ができる。それも、ラッシュ時など交通量の多い時に渋滞は発生して、交通量の少ない時にはどこにも渋滞は発生しない。中性子星の場合も同じで、明るくなり、表面で流せる限界の光度になるとせきとめられたエネルギーがたまって表面が膨らむ。

それではエディントン限界がどのようにしてきまっているのかを説明しよう。星の内部のガスは二つの力にひばられている。一つは重力で星の中心方向へひばっている。もう一つは光圧で外へ出てゆく光に蹴とばされるために生じる力で外向きに押している。星がひとつの形にまとまっているためには、中心にひばる重力のほうが強くなくてはならない。したがって重力の強さに応じて、光圧による力が重力を上回らずに流せる光量には上限、エディントン限界がある。このエディントン限界は、重力が星の質量に比例するので、同様に星の質量に比例する。しかし、星の半径にはよらない量である。なるほど、重力は中心までの距離の逆自乗に比例し、単位面積当りの光量は中心までの距離の逆自乗に比例するが、面積が増えるので星全体で見れば流せる光量は同じになるからである。重力はおなじ質量のものには同じ強さで働く。しかしおなじ質量の物質でも光圧を感じやすいものと感じにくいものがある。このためひとつの星でも場所によって光を流しやすいところ（エディントン限界の大きい所）と光の流しにくいところ（エディントン限界の小さい所）ができる。今考えている中性子星の場合、自由電子と光の弾性散乱が光圧をガスに伝える役目になっている。この電子と光の弾性散乱は高エネルギーではいく分起きにくい（クライン・仁科の公式）。温度が低い星の表面では低エネルギーの光が多いので光圧を感じやすく、エディントン限界は小さい。一方少し内側の熱核反応によって温められた温度の高い領域は、高エネルギーの光が多いので光圧は伝わりにくく、エディントン限界は大きい。

これで一応なぜ中性子星が膨らむかという説明になっていると思うが、表面に熱がたまると温度があがり光を流しやすくなることを心配する人があるかもしれない。しかしその心配は当らない。熱エネルギーをもらって膨張した表面のガスは膨張の際に仕事をするために、熱エネルギーが加わったのにかえって温度は下がる。故に熱エネルギーをもらったために一層熱エネルギーを流しにくくなり、ますます熱がたまるからである。熱エネルギーをもらって温度が下がるとはちょっと奇妙だが、重力



の効いている系ではこの手のことはよく起ることである。

流せる限界いっぱい光が出てくるということは、重力と同じだけの力で外向きに押されていることになり、実効的には重力がなくなっていることに対応する。だから膨らむと考えてもよい。

3. どこまで膨らむか

1982年にはわからなかった問題、中性子星はどこまで膨らむのかに答が出はじめてきたのは1983年、今年である。パチンスキーは一般相対論を使ってフラッシュの模擬実験をした結果を報告した。前節までの話は重力が距離の逆自乗に比例するというニュートン力学にもとづいた話だが、定量的なことを考えるときには一般相対論の効果を無視して中性子星を語ることはできない。一般相対論の効果として大きく効くのは、(1) 逆自乗の法則より重力が強くなる、(2) 中性子星から出た光は重力場をはい上るのに仕事をするので弱くなる(赤方偏移)、の二つである。(1)の効果は一般相対論の効果が大い内部でエディントン限界を大きくする。(2)の効果は逆に外側では光が重力赤方偏移によって弱くなるために外側でのエディントン限界が内側と比べ相対的に大きくなったことと同じ意味をもつ。つまり両者は正反対の働きをする。赤方偏移の量を表す z を使って二つの効果を比較すると(1)は $(1+z)$ に比例した効果で(2)は $(1+z)^2$ に比例した効果をもつので、両方を足すと(2)の効果が半分だけ効いたのと同じになる。したがって一般相対論によると、星が適当に膨張すると外側では光を流しやすくなり、エネルギーの渋滞は解消して膨張はとまる。

一般相対論の効果で膨張を止めるのにも限界がある。中性子星の質量、半径を考えると z は0.2ぐらいの数にしかならない。したがって中性子星の重力赤方偏移によってエディントン限界が大きくなるのは約1.2倍である。他方フラッシュで核エネルギーがつき込まれた領域では前に述べた電子と光の弾性散乱の性質のためにエディントン限界が約3倍までは大きくなりうるので、重力赤方偏移を考えても外側では流しきれない光量を流すこともある。そんな時にはもはや膨張をくい止める力はなく、定常的な膨張、中性子星風とでも呼ぶべきものがおこる。このような状態になった中性子星についての研究は日本人(戒崎・花輪・杉本、加藤)によってなされた。

今までのことをまとめると、フラッシュで明るくなった中性子星には3つの状態があることがわかった。暗いほうから順に並べると、(A) 中性子星の上に新しく降り積ったガスが薄くはりついている状態 (B) 新しく降り積ったガスのごく表面が膨らんでいる状態 (C) 新し

く降り積ったガスのごく表面が膨らんでさらに外向きに流れている状態、である。ここまでが1983年夏(この原稿を書いている時点)での答えである。

4. 観測では

理論の話ばかり書いてきたが、最後にX線バースト源の膨張についての観測の話をしてしよう。観測としては、X線バーストのスペクトルや光度などからX線バーストを起している領域の大きさを測ることができる。それによるとほぼ10kmという中性子星として典型的な大きさの天体からX線バーストがおこっていることがわかる。数少ないがバースト最中に発光領域が膨張する例も見つかっている。それは硬X線でみると時間的に2度のピークがあるのでダブルピークバーストと呼ばれているが、2回連続したバーストではなく2つのピークの間バースト源が膨張している1つのバーストであると考えられている。このダブルピークバーストの発見があったのは1981年以前の、“中性子星は膨らまない”と考えられていた時代であったので、ダブルピークバーストは熱核フラッシュモデルでは極めて説明しにくい現象と思われていた。現時点の熱核フラッシュモデルの理論から考えると、そのような現象はむしろあって当然なのに。

『“中性子星は膨らむことがある”という現在の理論でダブルピークバーストの問題は全面解決だ。』とは言えない事情もある。例えば、膨張のあるのはエディントン限界の光度に達した時だけかなどという問題が観測から出されているからである。膨張なしでエディントン限界を越したという観測がある。またごく表面がうすぼんやりと膨らんだ場合遠くから見たらどのように見えるかという問題もある。太陽風は地球軌道まで到達している(もっと遠くまで)が、太陽はそんなに膨らんで見えない。同様に中性子星が吹いているときにいったいどのくらいの大きさに見えるか。これらのことについて観測的にも理論的にも多くの仕事になされつつある。しかしまだ論文の形で報告されていないものについては、今回の原稿では割愛した。それらについてはまたいづれの日にか月報に報告されることもあるだろう。

訃 報

本会元理事長、奥田豊三氏は、去る10月7日午前8時44分、75歳で逝去されました。

謹んで御冥福をお祈りするとともに、会員諸氏にお知らせ致します。